

УДК 628.12

## АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Д.В. Толпаров, Ю.Н. Дементьев

Томский политехнический университет

E-mail: [tdv@elti.tpu.ru](mailto:tdv@elti.tpu.ru)

*Произведена систематизация и сравнительный анализ схемных решений систем управления насосными станциями. Приведены основные особенности при работе различных систем управления автоматизированных станций. Сформулированы критерии для выбора эффективных конфигураций систем управления.*

### Введение

В современных условиях развития российской экономики программы энергосбережения и рационального использования ресурсов начинают играть ведущую роль в увеличении конкурентоспособности продукции отечественных производителей. Снижение себестоимости любого изделия и повышение его качества во многом становятся серьезными задачами для предприятий, работающих с постоянным дефицитом квалифицированного персонала и ограниченными инвестициями. При этом наблюдается устойчивый рост спроса на современные энергоэффективные инструменты интенсификации и автоматизации технологических процессов. Среди них можно выделить преобразователи частоты для управления асинхронными электродвигателями.

На сегодняшний день массовое внедрение систем частотного регулирования стало возможно благодаря высоким показателям энергосбережения на механизмах с переменным моментом. Прежде всего, это центробежные насосы. Они являются основными механизмами первичных и вторичных коммуникаций промышленных и бытовых объектов. В этих областях давно уже пройден психологический барьер внедрения нового оборудования. Повсеместное использование преобразователей частоты на насосном оборудовании показало существенное влияние множества особенностей технологических систем и их эксплуатации на величину получаемого эффекта [1]. Дополнительно функциональные возможности преобразователей частоты позволяют построить на их базе автоматизированные системы управления насосными станциями с повышенным эксплуатационным ресурсом. Эти системы представляют особый интерес по причине минимальных технологических требований к ним [1, 2].

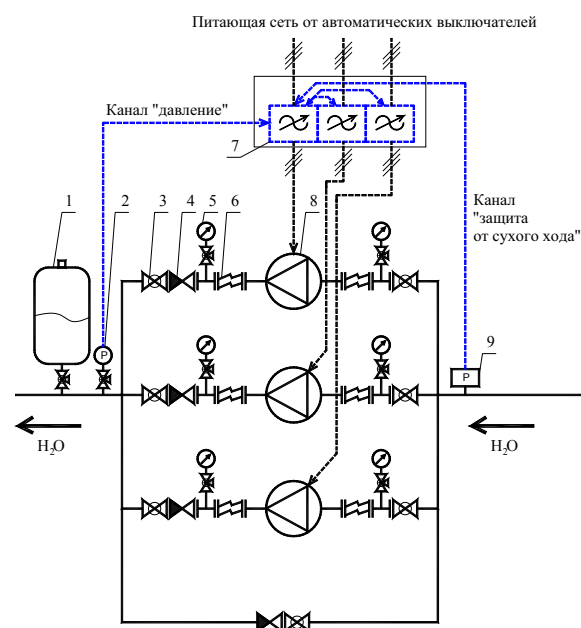
Целью данной статьи является построение эффективных структур систем управления насосных станций. Для этого производится исследование влияния основных технологических и эксплуатационных факторов на работу совместного группового управления насосами. Дополнительно анализируются современные технические решения систем управления насосных станций и критерии их выбора.

### Принцип работы насосной станции

Технологическая схема с насосами зачастую является системой с переменными параметрами, чаще всего расхода перекачиваемой жидкости. В связи с этим насосное оборудование должно обеспечивать определённый расход перекачиваемых сред, преодолевая гидравлические сопротивления систем трубопроводов. При увеличении ширины полосы требуемого расхода возможно использование групп параллельно установленных насосов вместо одного большого. В этом случае, подключая и отключая необходимое количество насосов, можно обеспечить требуемый уровень расхода в определённый период времени. Это решение давно известно и повсеместно используется практически на всех предприятиях. Насосы при этом чаще работают в зонах высокого гидравлического КПД, а система в целом обладает большей надёжностью с позиции резервирования. Такое групповое управление насосами в структуре станций подверглось существенному изменению в приводной части с появлением современных преобразователей частоты.

Современная насосная станция — это группа насосов и их система управления, работающая по определённому закону в автоматическом режиме, обладающая полным набором электрических и технологических защит. На рис. 1 приведён пример функциональной схемы станции водоснабжения. По ней можно рассмотреть принцип работы группового управления насосами. В основе автоматической работы лежит параллельная работа насосов на единый выходной коллектор в функции технологического параметра, в данном случае давления. Все насосы в группе развивают одинаковый напор. При изменении производительности системы по отклонению измеряемой физической величины производится автоматическое включение или отключение дополнительных насосов. Количество насосов в реальных системах варьируется от двух до семи и определяется оптимальным между зоной КПД, диапазоном расходов перекачиваемых сред, затрат на систему управления, требуемой надёжностью и резервированием. Контур регулирования технологического параметра построен на базе пропорционально-интегрального (ПИ)-регулятора. Особенность работы схемы насосных станций заключается в том, что в момент включения или отключения дополнительных насосов происходит

блокировка работы ПИ-регулятора для снижения величин скачков давления в трубопроводе и отсутствия ложных коммутаций электродвигателей дополнительных насосов.



**Рис. 1.** Пример функциональной схемы насосной станции системы водоснабжения: 1) гидропневматический бак, «гидроаккумулятор» с обвязкой и предохранительным клапаном; 2) датчик давления с обвязкой; 3) запорная арматура; 4) обратный клапан; 5) манометр с обвязкой; 6) виброкомпенсатор; 7) преобразователь частоты; 8) насос, проточная часть с электродвигателем; 9) реле давления

В схеме на рис. 1 отсутствует входной фильтр, т. к. в большинстве систем он присутствует на входе в водомерный узел или в системе учёта расхода воды. Пунктиром указаны элементы силовой и информационно-энергетической части.

#### Типовые конфигурации систем управления насосных станций

Рассмотрим подробнее, какие решения предлагают ведущие производители насосных станций и систем управления для них [1]. В номенклатурных рядах различного исполнения можно выделить пять основных схем построения систем управления:

1. Электродвигатели насосов в станции подключаются напрямую к сети через пускатели. При мощности двигателей более 4 кВт запуск осуществляется по схеме звезда/треугольник. Контроль регулирования выполнен на внешнем контроллере. К нему же подключается датчик давления напорного и всасывающего коллектора, а также катушки пускателей.
2. Один из насосов в станции имеет встроенный децентрализованный преобразователь частоты. Контроль регулирования выполнен на базе внешнего контроллера с ПИ-регулятором, кото-

рый изменяет производительность главного насоса по шине связи. При увеличении требуемого расхода системы регулятор с помощью встроенных реле контроллера коммутирует катушки пускателей дополнительных насосов. При мощности электродвигателей более 4 кВт запуск производится по схеме звезда/треугольник.

3. Все насосы станции имеют встроенные преобразователи частоты. Контроль регулирования выполнен на базе ПИ-регулятора одного из преобразователей частоты. Регулятор по единой шине осуществляет подключение и отключение подчинённых преобразователей частоты, а также формирует для них задание скорости вращения.
4. В системе управления присутствует внешний преобразователь частоты, который имеет дополнительную возможность переключения на любой из электродвигателей насосов станции с помощью коммутации пускателей силовых выходных цепей. Контроль регулирования также выполнен на его программном ПИ-регуляторе. Катушки пускателей дополнительных насосов коммутируются от нескольких реле преобразователя частоты. При мощности электродвигателей свыше 4 кВт подключение и отключение дополнительных двигателей осуществляется по схеме звезда/треугольник.
5. Все электродвигатели насосов управляются от внешних преобразователей частоты. Контроль регулирования выполнен на базе ПИ-регулятора одного из преобразователей частоты. Регулятор осуществляет подключение и отключение подчинённых преобразователей частоты, а также по единой шине формирует для них задание скорости вращения.

В предписании к подбору станций указано, что выбор того или иного типа системы управления связан с множеством требований со стороны технологического процесса. С позиции производителя станций при перепадах давления во всасывающем трубопроводе не менее 100 кПа рекомендуется установка систем с насосами управляемыми только от преобразователей частоты [1, 2]. Этому условию соответствуют конфигурации 3 и 5.

Схемы 1 и 2, обеспечивающие прямые запуски насосов, создают значительные скачки давления, гидроудары в системе. Следовательно, их применение возможно только при наличии гидропневматических баков повышенного потребного объёма в напорной стороне станции. Это в свою очередь возможно в небольших системах, где объёмы баков не превышают 1 м³. В системах с требуемым большим объёмом баков уровень затрат превышает первоначальные инвестиции от выбора более функциональных конфигураций станций 3 или 5.

Конфигурация 4 схемы системы управления рекомендуется при использовании пяти или шести насосов в станции. Такое количество увеличивает вероятность длительного простоя некоторых из них.

Чаще всего это резервные насосы. В их проточной части при наличии растворённого воздуха в жидкости активно идут процессы коррозии. Они затрагивают контактные зоны рабочего колеса, уплотнений и улитки. Щелевая коррозия со временем приводит к тому, что при выходе из строя основных насосов происходит запуск резервных с заклиненным валом. Система по аварии останавливается полностью. Похожий результат наблюдается при длительном простое электродвигателя. Т. к. в помещениях станций трубопроводы зачастую не изолированы, температура сезонно меняется, в электродвигателе скапливается влага. Со временем это ведёт к снижению прочности изоляции и коррозии подвижных частей машины. При запуске насоса в таком двигателе возможно заклинивание ротора, либо выход из строя обмотки статора. Чтобы равномерно загрузить все насосы во времени, включая резервные, конфигурация схемы управления станцией 4 позволяет переключать выходные цепи преобразователя частоты на разные электродвигатели.

Проблемы длительного простоя наблюдаются в системах станций пожаротушения, где насосы длительное время находятся в режиме ожидания. При их запуске, по указанным выше причинам, происходит отключение автоматического выключателя. Во избежание этого, помимо коротких запусков по таймеру, для данных систем существует специальная конфигурация. Она позволяет плавно запустить насос и снизить пусковые токи, уменьшая вероятность отключения автоматических выключателей. Если устройство плавного пуска не обеспечивает требуемый пусковой момент электродвигателя, то по истечении времени задержки через шунтирующий контактор произойдёт прямой запуск.

### Обобщённые структуры систем управления насосных станций

Указанные конфигурации схем построения систем управления работоспособны для готовых насосных станций с единичной мощностью электродвигателя до 30...45 кВт. Практически это предел для большинства общепромышленных систем при работе станций в автоматическом режиме с прямыми пусками на открытую задвижку. Общая функциональная схема таких систем управления приведена на рис. 2. Дальнейшее увеличение габарита насосов и единичной мощности электродвигателей насосов в станциях определяет значительные отличия в схемах управления от указанных выше конфигураций.

Общепромышленные насосы с мощностью электродвигателя свыше 45 кВт практически всегда запускались с пониженным моментом на закрытую задвижку и требовали постоянного обслуживания и мониторинга со стороны технических служб. Современные требования к автоматизации насосных станций не позволяют в полной мере распространить мировой опыт на отечественные промышленные объекты. Причин здесь много и связаны они больше с вопросами относительно низкой окупаемости полных проектов реконструкции. Поэтому в дальнейшем имеет смысл рассматривать автоматизацию насосных станций с позиций модернизации приводной части и контрольно-измерительного оборудования.

Как уже было сказано, по причине невозможности запусков на открытую задвижку варианты конфигураций схем систем управления 1, 2, 4 не могут быть использованы. Наиболее популярная и бюджетная конфигурация систем напоминает схему 4 с добавлением в неё тиристорных устройств



**Рис. 2.** Функциональная схема системы управления насосной станцией с одним преобразователем частоты: M1, M2, M3, MX – асинхронные электродвигатели насосов в станции; ПЧ 1 – преобразователь частоты



**Рис. 3.** Функциональная схема системы управления насосной станцией с одним преобразователем частоты и устройствами плавного пуска: УПП 1, УПП 2, УПП X – тиристорные устройства плавного пуска

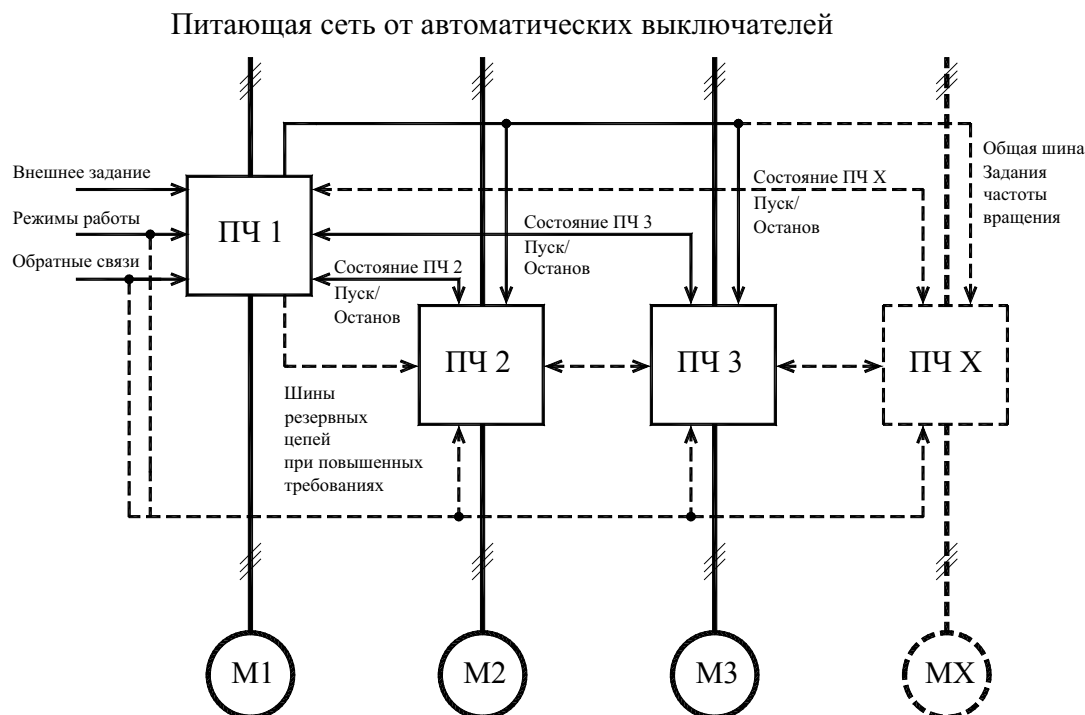
плавного запуска и останова электродвигателей подчинённых насосов. Это обеспечивает их безударный запуск и останов на открытую систему трубопроводов. Функциональная схема этой конфигурации приведена на рис. 3.

Следует выделить ещё один вариант решения, когда выходные цепи преобразователя частоты могут быть соединены с электродвигателем каждого подчинённого насоса через дополнительные пускатели. Это позволяет осуществлять переключение частотного привода на любой из электродвигателей станции, что обеспечивает бесперебойную работу системы при выходе из строя любого насоса, а также уравнивает во времени их загрузку с увеличением ресурса всей схемы. Среди недостатков этого решения можно отметить рост количества пускорегулирующей аппаратуры. Начиная с мощности электродвигателя более 90 кВт это мало оправдано и ведёт к увеличению затрат на обслуживание и эксплуатации. Поэтому при единичной мощности свыше 110 кВт целесообразна схема конфигурации 5 системы управления станцией, когда на каждый электродвигатель устанавливается свой преобразователь частоты.

Функциональная схема такой системы управления насосной станцией приведена на рис. 4. Эффект от одной скорости вращения всех насосов может иметь дополнительно до 10...12 % от общего вклада в энергосбережение. Причина заключается в том, что отсутствуют потери давления в выходном коллекторе из-за различных скоростей потоков перекачиваемой среды от насосов в группе. При этом

происходит существенное снижение затрат на обслуживание и эксплуатацию самой системы управления станцией. Можно обеспечить выбор любого насоса в качестве основного без громоздких схем коммутации выходных цепей и в аварийных ситуациях по выходным цепям преобразователя частоты оставить контур регулирования в работе на других насосах. Выбор частот, при которых производится плавный запуск, останов и регулирование скорости электродвигателей подчинённых насосов производится по зонам максимального КПД насосов, с учётом допустимого количества запусков в час электродвигателей и допустимого изменения давления в системе трубопроводов.

Существует ещё одно техническое решение системы управления насосной станцией на базе преобразовательной техники ряда производителей. Преобразователь частоты со специальной функцией управления также регулирует производительность одного из насосов. При превышении его производительности сверх установленного уровня, преобразователь частоты обеспечивает синхронизацию входного и выходного напряжения по фазе и амплитуде. После синхронизации обеспечивается шунтирование преобразователя с прямым подключением электродвигателя на питающую сеть. Синхронизация обеспечивает снижение бросков тока примерно до уровня пусковых с более коротким периодом времени. Зашунтированный преобразователь частоты с помощью коммутации выходных цепей переключается на следующий электродвигатель. При этом второй насос становится регулируемым.



**Рис. 4.** Функциональная схема системы управления насосной станцией с подчинёнными преобразователями частоты: ПЧ 1, ПЧ 2, ПЧ 3 – преобразователи частоты

Далее этот двигатель также можно вывести на максимальную производительность и переключить на сеть и т. д. Отключение двигателей станции происходит в обратном порядке. Данная схема имеет ряд недостатков, таких как повышенные первоначальные и эксплуатационные затраты на пускорегулирующую аппаратуру, а также очень низкую надёжность самого схемного решения. Идея схемы с синхронизатором заимствована из систем запуска мощных синхронных двигателей. Размеры инвестиций и сроки окупаемости в таких системах ограничивают количество единиц преобразовательной техники. Поэтому схема используется в системах насосных станций с электродвигателями напряжением более 1 кВ.

Системы насосов с встроенными преобразователями частоты с позиции бесперебойной работы могут потребовать использование дополнительных резервных насосов. В случае выхода из строя такого преобразователя частоты не удаётся оставить насос в работе [3].

#### Результаты исследования

По результатам исследования можно отметить существующее многообразие конфигураций схем систем управления автоматизированными насосными станциями. Экономические предпосылки при модернизации приводной части насосных станций ведут к постоянному увеличению количества преобразовательной техники. При этом возрастает потребность в децентрализованном защитном исполнении преобразователей частоты. Система управления, построенная на таких преобразова-

телях, позволяет отказаться от габаритных электро-монтажных шкафов или подготовленных помещений, приблизить преобразователь частоты непосредственно к электродвигателю и снизить проблемы с электромагнитной совместимостью, потерями в обмотках. Дополнительно достигается максимальный эффект от энергосбережения при минимальных затратах на реконструкцию и монтаж.

**Таблица.** Результаты сравнения обобщённых структур систем управления насосных станций по основным показателям

Основные показатели	Схема		
	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4
Относительная величина первоначальных инвестиций, %	45	68	100
Относительные затраты на эксплуатацию технологической части станции за 5 лет, %	100	60	50
Относительные затраты на эксплуатацию системы управления станцией за 5 лет, %	100	83	56
Относительная энергоэффективность (прямой эффект), %	81	82	100
Относительная эффективность, точность, спец. функции (косвенный эффект), %	80	85	100
Рекомендуемый диапазон мощностей электродвигателей насосов в станции, кВт	0,37...45(90*)	30...110	75...500
Рекомендуемое количество насосов, шт	2–5	2–4	3–4

\*В скобках указана мощность для варианта схемы синхронизации с сетью

Получение единого интегрального показателя эффективности внедрения рассматриваемых схем представляется сложной многокритериальной задачей. Для каждой системы производится уникальный технико-экономический анализ. Тем не менее, возможно сравнить относительные показатели затрат и эффективности между схемами. Для этого рассматриваются системы управления для мощностей электродвигателей насосов от нескольких десятков до 500 кВт. Количество насосов в станции составляет от трёх до четырёх единиц. При этих условиях основные относительные показатели затрат и эффективности между схемами в рассматриваемых диапазонах приблизительно постоянны [4]. Результаты сравнения приведены в таблице. За 100 % затрат принимаются максимальные затраты среди рассматриваемых схем для условной одной и той же станции. За 100 % относительной эффективности берётся также максимальная величина.

Используя данные таблицы, можно сделать выводы о наличии оптимальных диапазонов эффективного использования рассматриваемых структур. Для электродвигателей насосов малых и средних мощностей до 110 кВт более эффективны структуры, рис. 2, 3. При дальнейшем увеличении единичной мощности электродвигателей оправдано использование структуры, рис. 4. В рекомендуемом диапазоне числа насосов соответствующая структура позволяет обеспечить максимальный эффект и минимальные затраты. В итоге с исходной информацией по конкретной насосной станции становится возможным быстро произвести коррекцию уровня получаемого эффекта и затрат в технико-экономическом обосновании модернизации систем управления. Каждая из трёх структур имеет свою область применения и с учётом приведённых рекомендаций позволяет выбрать оптимальную конфигурацию системы управления при автоматизации насосных станций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чебаевский В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок – М.: Колос, 2000. – 376 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 1999. – 888 с.
3. Толпаров Д.В. Эффективность использования насосов со встроенными преобразователями частоты в системах вентиляции, отопления и водоснабжения // Оборудование – регион. – 2006. – № 3. – С. 23.

4. Тысивский И.В., Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Ресурсосберегающее управление электроприводами насосов системы коммунального водоснабжения // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. – 1998. – С. 237–238.

Поступила 03.10.2007 г.

УДК 621.313.36

### ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В ПРОЦЕССЕ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

О.С. Качин

Томский политехнический университет  
E-mail: kos@tpu.ru

*Рассмотрены вопросы определения механического состояния коллекторно-щеточных узлов в динамических режимах с применением разработанных в ТПУ методик обработки результатов измерений, полученных с использованием бесконтактного профилометра. Приведены результаты экспериментальных исследований механического состояния коллекторно-щеточного узла электродвигателя переменного тока в процессе наработки на ресурс, произведен анализ экспериментальных данных, выработаны рекомендации по улучшению условий токосъема в скользящем контакте и увеличению ресурса щеток.*

Повышение коммутационной надежности и ресурса современных высокоскоростных коллекторных машин во многом определяется механической стабильностью электрического скользящего контакта (СК). Однако поведение СК в динамике недостаточно изучено в теоретическом и экспериментальном плане ввиду сложности протекающих процессов, а также отсутствия специальных измерительных систем и методик обработки измеряемой информации [1–4].

Целью проведенных исследований была апробация разработанных в Томском политехническом университете (ТПУ) методик, позволяющих выделять интересующую разработчиков коллекторных электрических машин информацию об изменении профиля коллектора в процессе эксплуатации, о величине и характере вибраций якоря, а также о других механических параметрах из всего массива результатов измерений, проведенных с применением бесконтактного профилометра. На основе